طراحی بهینه‌ی مخازن جدار نازک با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری*

(یادداشت پژوهشی)

علی قدوسیان[۱]		هادی اسکندر[۲]		مجتبی شیخی[۳]

چکیده *در سال‌های اخیر استانداردهای مختلفی در طراحی مسائل مهندسی از جمله مخازن تحت فشار ارائه شده است. بسیاری از این استانداردها بر اساس تجربه و آزمایش به‌دست آمده‌اند. امروزه اکثر تحقیقات به تحلیل عددی اجزای مختلفی از مخازن تحت فشار پرداخته و در بعضی موارد حتی استانداردهای پیشین را زیر سوال برده‌اند. این مقاله با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک از جمله الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری به طراحی بهینه‌ی مخازن تحت فشار با در نظر گرفتن تمام قیود و ضوابط مهندسی حاکم بر آن می‌پردازد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک می‌توانند به‌عنوان یک روش طراحی ساده، سریع و کارا برای طراحی مخازن مورد استفاده قرار گیرند. طراحی مخازن به‌کمک این روش‌ها باعث کاهش قابل توجه وزن مخازن نسبت به طراحی انجام گرفته در هندبوک می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده به‌کمک روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک، الگوریتم رقابت استعماری دارای عملکرد و همگرایی به‌مراتب به‌تر از دو روش دیگر ذکر شده می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی مخازن تحت فشار، روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک، الگوریتم رقابت استعماری.

Optimal Design of Vessels by using Imperialist Competitive Algorithm

A. Ghoddosian		H. Eskandar		M. Sheikhi

Abstract *As the science of Mechanics has been improved in recent years, different standards have been created in designing structures such as pressure vessels. Most of these standards have been developed by means of experience and examination. Today, most of researches, proceed the numerical analysis of the different elements of the pressure vessels and somehow they have put some questions on the previous standards. In this paper, offering an applicable model, it is shown that heuristic optimization methods such as genetic algorithm, particle swarm optimization and especially imperialist competitive algorithm can be used as a simple and fast method for designing the vessels without breaking any of the engineering conditions and criteria. Due to the present results of this research, these methods are caused a noticeable decrease of the vessel's weight, with a high convergence speed, in a short time, compare to the design carried out in handbooks. You may observe that the Imperialist Competitive Algorithm has a better performance and convergence than the two other methods.*

Key Words pressure vessels, heuristic Optimization Methods, Imperialist Competitive Algorithm

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱۱/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۲/۱۳ می‌باشد.

(۱) دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان.

(۳) نویسنده‌ی مسؤول: عضو هیأت علمی، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند.

مقدمه

طراحی مناسب و ایمن مخازن تحت فشار به‌علت کاربرد وسیع آن‌ها در صنایع مختلف و شرایط کاری سخت از جمله تحمل فشار و دماهای بالا، در معرض خوردگی بودن، اثرات نیروی باد، زلزله‌خیز بودن ناحیه‌ی قرارگیری مخزن و ... مورد توجه محققان بوده است. علاوه بر این مخازن تحت فشار انرژی زیادی را در خود نگه می‌دارند، آزاد شدن این انرژی در یک لحظه بر اثر استفاده از روش‌های طراحی ضعیف که قادر به در نظر گرفتن تمام معیارهای طراحی مخازن نباشد و یا عدم نگهداری صحیح و کاربرد نادرست آن‌ها، تلفات جبران‌ناپذیری را به‌وجود می‌آورد [1]. به همین دلیل باید در طراحی این مخازن از روش‌های مطمئن و کارا بهره برد.

هدف این مقاله طراحی یک مخزن جدار نازک با در نظر گرفتن یک فشار داخلی تحت تأثیر نیروی باد می‌باشد. معمولاً مخازن تحت فشار مورد استفاده در صنعت متقارن محوری هستند و از ترکیب اجزائی با شکل‌ها و ضخامت‌های مختلف ساخته می‌شوند. اعمال نیروی باد به مخزن آن را از حالت تقارن محوری خارج می‌کند. نیروی باد باعث ایجاد یک ممان خمشی روی مخزن می‌شود. تحت تأثیر این ممان خمشی، یک تنش طولی و یک خیز (تغییر فرم) روی مخزن ایجاد می‌گردد. کنترل و کاهش خیز و تنش ناشی از بارهای اعمالی از نکات مهم در طراحی مخازن تحت فشار می‌باشد [2]. برای کاهش خیز و تنش‌های ایجاد شده در مخزن لازم است تا ضخامت و ارتفاع هر پوسته و ضخامت پایه‌ی مخزن تغییر کند.

تاکنون محققان برای طراحی بهینه‌ی پارامترهای مهم در مخزن از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی از قبیل الگوریتم ژنتیک [3]، الگوریتم بازپخت فلزات [4] (Simulated Annealing) و دیگر روش‌های جستجوی تصادفی استفاده کرده‌اند. در این مقاله علاوه بر بهره‌گیری از روش‌های الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات (Particle Swarm Optimization)، از روش رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm) که روشی جدید و قدرتمند است و الهام گرفته از یک پدیده‌ی اجتماعی- انسانی است، استفاده می‌گردد.

در ادامه پس از تشریح مبانی تئوری روش رقابت استعماری و گروه ذرات و کاربرد آن‌ها در طراحی مخازن تحت فشار، نتایج حاصل با نتایج موجود در هندبوک مقایسه می‌شود. بر اساس مقایسه‌ی صورت گرفته، این سه روش، به‌ویژه روش رقابت استعماری طی زمان مناسب قادر است علاوه بر ارضا قیود طراحی، مقدار وزن مخزن را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط اسماعیل آتشپز و همکارانش [5] به کار گرفته شد. به‌طور ویژه این الگوریتم به فرآیند استعمار، به‌عنوان مرحله‌ای از تکامل اجتماعی- سیاسی بشر می‌نگرد و با مدل‌سازی ریاضی این پدیده‌ی تاریخی، از آن به‌عنوان منشأ الهام یک الگوریتم قدرتمند در زمینه‌ی بهینه‌سازی بهره می‌گیرد. نو بودن ایده‌ی پایه‌ای الگوریتم، توانایی بالای یافتن نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری مسائل در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و سرعت همگرایی بالا از جمله ویژگی‌های این الگوریتم می‌باشد.

این الگوریتم نیز نظیر سایر روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری با یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود. در این الگوریتم هر عنصر جمعیت یک کشور (معادل کروموزوم در الگوریتم ژنتیک) نامیده می‌شود. کشورها نیز در آن به دو دسته کشورهای مستعمره و کشورهای امپریالیست تقسیم می‌شوند. هر کشور امپریالیست، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه‌ی خود در می‌آورد و در مجموع یک امپراطوری را تشکیل می‌دهند. مراحل پیاده‌سازی این الگوریتم به‌طور کامل در مراجع [6,7] تشریح شده است.

روش الگوریتم گروه ذرات

الگوریتم گروه ذرات توسط ابرهارت و کندی در سال ۱۹۹۵ ابداع شده است [8]. در این الگوریتم پس از تولید جمعیت اولیه و در نظر گرفتن یک سرعت اولیه برای هر یک از آن‌ها، کارایی هر ذره براساس موقعیتش مورد محاسبه قرار می‌گیرد. هر ذره سرعتش را براساس به‌ترین پاسخ به‌دست آمده در گروه ذرات (تجربه‌ی گروهی) و به‌ترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته (تجربه‌ی شخصی) تغییر می‌دهد. این سرعت با موقعیت ذره جمع می‌شود و موقعیت جدید آن را به‌دست می‌دهد [9]. سرعت ذرات در هر مرحله با توجه به رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

$$v^i_{k+1} = w v^i_k + c_1 r_1 (p^i_k - x^i_k) + c_2 r_2 (p^g_k - x^i_k) \qquad (۱)$$

در این رابطه r_1 و r_2 دو عدد تصادفی در بازه‌ی [۱ و ۰] می‌باشند. P^i_k و P^g_k به‌ترتیب، به‌ترین موقعیتی که تاکنون ذره در آن قرار گرفته و به‌ترین موقعیت به‌دست آمده تا این مرحله هستند. ضرایب c_1 و c_2، فاکتور یادگیری‌اند و مجموع آن‌ها باید کم‌تر از ٤ باشد [۷]. w ضریب اینرسی وزنی (ضریب بی‌عقلی) نامیده می‌شود. ضریب اینرسی بزرگ‌تر، گسترش بیش‌تر در فضا بدون توجه به تجربه‌ی شخصی و تجربه‌ی گروهی را موجب می‌شود. با این اوصاف ضریب اینرسی کوچک‌تر، جمع‌شدن و حرکت در محدوده‌ی اطراف موقعیت فعلی را باعث می‌شود.

اعمال قیود

در زیر دو روش برای اعمال قیود در الگویتم‌های رقابت استعماری و گروه ذرات پیشنهاد می‌گردد.

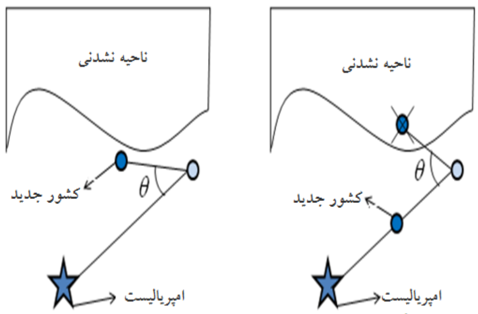
– در روش رقابت استعماری باید اصلاحات زیر در الگوریتم اعمال گردد.

– کشوری که به‌عنوان کشور امپریالیست در نظر گرفته می‌شود، باید علاوه بر داشتن قدرت بیش‌تر، قیود اعمالی به مسأله را ارضا نماید.

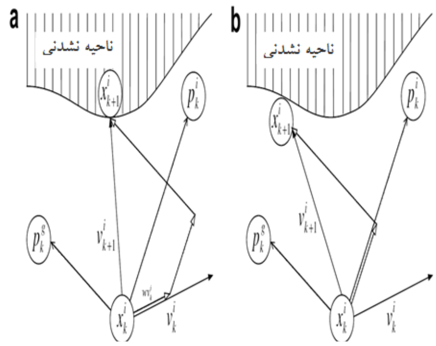
– اگر در حرکت کشور مستعمره به سمت کشور امپریالیست، انحراف باعث نقض قیود شود، از منحرف شدن کشور مستعمره جلوگیری می‌شود و فقط حرکت مستقیم در جهت کشور امپریالیست انجام می‌شود (شکل (۱)).

در روش الگوریتم گروه ذرات، برای اعمال قیود می‌توان بدین ترتیب عمل نمود.

– در صورتی که حرکت جدید ذره باعث نقض شدن قیود گردد، از حرکت آن در راستای بردار سرعت قبلی جلوگیری می‌شود و ذره سرعتش را بر اساس تجربه‌ی شخصی و به‌ترین تجربه‌ی گروهی تغییر می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۱ شمای کلی چگونگی اعمال قیود در الگوریتم رقابت استعماری

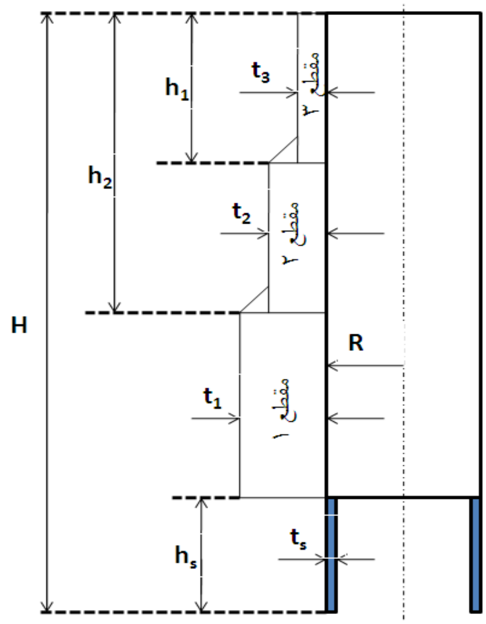


شکل ۲ شمای کلی چگونگی اعمال قیود در الگوریتم گروه ذرات

پارامترهای مهم در طراحی بهینه‌ی مخازن

یک مدل ریاضی در انجام فرآیند بهینه‌سازی دارای سه بخش کلی متغیر طراحی، تابع هدف و قیود مسأله است که در این‌جا به‌صورت مجزا به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

متغیر طراحی. مقادیر مجهولی که باید به‌گونه‌ای حاصل شوند که به ازای آن‌ها تابع هدف بهینه شود. این متغیرها در مسأله‌ی مورد نظر عبارتند از: ضخامت و ارتفاع هر پوسته از بالای مخزن. متغیرهای مذکور به‌همراه سایر مشخصات مخزن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ مشخصات مخزن

کران پایین و بالا برای ضخامت هر پوسته از رابطه‌ی (۳ و ۲) تبعیت می‌کند.

$$t_{low} < t_i < t_{up} \quad i = 1,2,3 \tag{۲}$$

$$\begin{cases} t_{low} = 0 \\ t_{up} = (D_1/2) - R \end{cases} \tag{۳}$$

در رابطه‌ی فوق D_1 حداکثر ضخامت عایق در مخزن می‌باشد.

هم‌چنین کرانه‌های پایین و بالا برای ارتفاع هر پوسته از بالای مخزن نیز از رابطه‌ی (۵ و ٤) پیروی می‌کند.

$$h_{low} < h_i < h_{up} \quad i = 1,2 \tag{٤}$$

$$\begin{cases} h_{low} = 0 \\ h_{up} = H - h_s \end{cases} \tag{۵}$$

تابع هدف. هدف از بهینه‌سازی مخزن تحت فشار، کاهش وزن مخزن از طریق بهبود در ضخامت و ارتفاع هر یک از ورق‌های مورد استفاده در مخزن می‌باشد. در رابطه‌ی (٦) مقدار وزن مخزن ارائه شده است.

$$W = \left[\sum_{i=1}^{3} W_{si} + \sum_{i=1}^{3} W_{INi} \right] + W_{SK} + W_g + W_{Other} \tag{٦}$$

در مخازن ٦ درصد وزن محاسبه شده به‌خاطر در نظر گرفتن وزن جوش‌های زده شده و تقریبی بودن وزن‌های مورد استفاده به معادله‌ی فوق اضافه می‌گردد [10] (اضافه شدن وزن جوش‌ها در فرآیند بهینه‌سازی تأثیری ندارد و صرفاً باعث محاسبه‌ی دقیق‌تر وزن مخزن می‌شود). بنابراین تابع هدف به کار رفته در مسأله به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$W \to 1.06W \tag{۷}$$

در رابطه‌ی (٦)، پارامترهای W_{si} ، W_{INi} ، W_{SK} به‌ترتیب وزن هر کدام از پوسته‌ها، عایق‌ها و پایه‌ی مخزن می‌باشد. چگونگی محاسبه‌ی این پارامترها در روابط (۱۰–۸) آورده شده است.

$$W_{si} = \pi \rho_s h_i \left[(R + t_i)^2 - R^2 \right], i = 1, 2, 3 \tag{۸}$$

$$W_{INi}=\pi\rho_{IN}h_i\left[(\frac{D_1}{2})^2-(R+t_i)^2\right],i=1,2,3 \quad (۹)$$

$$W_{SK}=\pi\rho_s h_s\left[(R+t_1)^2-(R+t_1-t_s)^2\right] \quad (۱۰)$$

شایان ذکر است که سایر پارامترهای رابطـه‌ی (٦) به‌عنوان ورودی مسأله در نظر گرفته شده و مقادیر آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ پارامترهای ورودی

متغیرهای ورودی	مقدار متغیر	واحد
H	۱۲۰۰ (۳۰/٤۸)	in (m)
H_{La}	۱۱۵۲ (۲٦/۲٦)	in (m)
H_{PL}	۱۱۷۸ (۲۹/۸۷)	in (m)
h_s	٤۸ (۱/۲۲)	in (m)
D_1	٤۲ (۱/۰٦۷)	in (m)
R	۱۸ (۰/٤٦)	in (m)
ρ_s	۰/۲۸۳۳	lb/in^3
ρ_{IN}	۰/۰۰۷۲	lb/in^3
W_{Other}	۹۰٤۳(٤۰/۲۳)	lb (kN)
W_g	۳۰۰۰ (۱۳/۳٤)	lb (kN)
P_w	۰/۲۰۸ (۱/٤٤)	Psi(kPa)
P	۱۵۰(۱۰۳٤/۲۱)	Psi(kPa)
EE	۰/۸۵	-
A_{La}	۱۲ (۰/۳۰)	$in^2/in(m^2/m)$
A_{PL}	۱۱۵۲ (۰/۷٤)	$in^2(m^2)$

قیود مسأله. از آنجا که تحقیق حاضر در زمینـه‌ی مخازن تحت فشار می‌باشد، قیود مربوط را می‌توان بـر اساس استانداردهای موجود به دو دسته قیود مربوط به تنش و قیود مربوط به خیز تقسیم کرد.

-قیود مربوط به تنش از روابـط (۱۱) تبعیـت مـی‌کنـد [10].

$$\begin{cases}\left|S^i_{wind}+S^i_L\text{-}S^i_{weight}\right|\le S.EE\\ \left|S^i_\theta\right|\le S.EE \qquad\qquad i=1,2,3\\ \left|S^i_{wind}+S^i_{weight}\text{-}S^i_L\right|\le S.EE\end{cases} \quad (۱۱)$$

در این رابطه، S تنش مجاز طراحی و EE ضریب اتصـال اسـت و بقیـه‌ی پارامترهـای رابطـه‌ی (۱۱) به‌صورت روابط (۱۵-۱۲) محاسبه می‌گردنـد. در ایـن روابط M و R_m به‌ترتیب ماکزیمم ممان خمشی در هـر مقطع از مخزن و شعاع متوسـط هـر یـک از ورق‌هـای مورد استفاده در مخزن می‌باشند.

$$S_{wind}{}^i=\frac{M_i}{R_{mi}{}^2\times\pi\times t_i} \quad (۱۲)$$

$$S_L{}^i=\frac{P\times R_{mi}}{2t_i} \quad (۱۳)$$

$$S_{weight}{}^i=\frac{w_i}{2\pi\times R_{mi}\times t_i} \quad (۱٤)$$

$$S_\theta{}^i=\frac{P\times R_{mi}}{t_i} \quad (۱۵)$$

ممان در مقطعـی بـه فاصـله‌ی x از بـالای مخـزن (شکل ٤) به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$M=M_w+M_{La}+M_{PL} \quad (۱٦)$$

پارامترهای ارائه شده در رابطه‌ی (۱٦) بـه‌صـورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$M_w=p_wD_1X(\frac{X}{2}) \quad (۱۷)$$

$$M_{La}=p_wA_{La}X_{La}(\frac{X_{La}}{2}) \quad (۱۸)$$

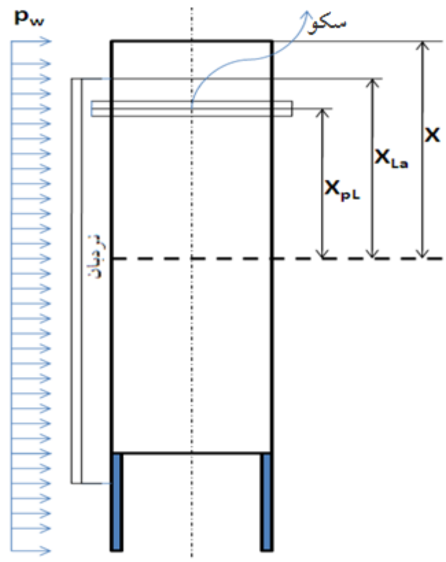
$$M_{PL}=p_wA_{PL}X_{PL} \quad (۱۹)$$

باید توجه داشت که مقدار ممان خمشـی بحرانـی در نقاطی که سطح مقطع مخزن تغییر پیدا می‌کند اعمال می‌گردد.

– قیود مربوط به خیز: چنانچه مطابق استاندارد، مخـزن به‌صورت تیر یک سرگیردار فرض شود، ماکزیمم تغییر فرم مخزن در اثر نیروی باد در بالای آن ایجاد می‌شود. تغییر فرم انتهای تیـر یـک سـرگیردار از رابطـه‌ی (۲۰)

به‌دست می‌آید [10].

$$\Delta_M = FL^3 / (8EI) \quad (۲۰)$$



شکل ٤ مخزن عمودی تحت اثر نیروی باد

نیروی ناشی از اثر باد (F) برابر است با حاصل ضرب فشار باد روی مخزن در سطح تصویر شده در برابر آن. بنابراین مقدار نیروی اعمالی از طرف باد به مخزن به‌صورت رابطه‌ی (۲۱) می‌باشد.

$$F = p_w D_1 L \quad (۲۱)$$

در صورتی که مخزن از چندین ورق با ارتفاع‌های مختلف ساخته شده باشد، تغییر فرم به‌صورت رابطه‌ی (۲۲) محاسبه می‌شود [1].

$$\Delta_M = \frac{p_w D_1}{8E}\left[\sum \frac{h_i^4}{I_i} - \sum \frac{h_i^4}{I_{i-1}}\right], \quad i = 1,2,3 \quad (۲۲)$$

لازم به ذکر است که مطابق استاندارد، حد مجاز تغییر فرم مخزن عمودی تحت فشار، ٦ اینچ به‌ازای هر ۱۰۰ فوت ارتفاع مخزن می‌باشد [10]. بنابراین قید به‌کار رفته در مسأله‌ی طراحی مخزن به‌صورت رابطه‌ی (۲۳) بیان می‌گردد.

$$\Delta_M \le \frac{6}{100 \times 12} H \quad (۲۳)$$

ارائه مثال

مثال اول از مرجع [10] انتخاب شده است، در این مثال یک مخزن عمودی، از فولاد SA-285C در دمای کاری ۲۰۰°F که دارای تنش مجاز طراحی ۱۵۷۰۰۰ Psi و مدول الاستیسیته ۳۰×۱۰^٦ Psi می‌باشد، تحت فشار داخلی و نیروی باد قرار گرفته است. این مقاله با استفاده از سه روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری به کمینه کردن وزن این مخزن می‌پردازد.

در تمام سه الگوریتم ذکر شده اندازه‌ی جمعیت اولیه برابر ۵۰ انتخاب شده است. در الگوریتم رقابت استعماری ضرایب β، γ، ξ و تعداد کشورهای امپریالیست به‌ترتیب برابر ۲، π/٤، ۰/۰۵ و ٤ در نظر گرفته شده است. در الگوریتم گروه ذرات ضرایب c_1 و c_2 برابر ۲ و ضریب اینرسی اولیه، ۰/۹ می‌باشند.

نتایج به‌دست آمده از ۲۵ اجرای متوالی سه روش الگوریتم رقابت استعماری، گروه ذرات و الگوریتم ژنتیک در جدول (۲) ارائه شده است. در جدول (۳) مقادیر متغیرهای طراحی مسأله برای به‌ترین جواب‌های به‌دست آمده توسط روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده است.

از مقایسه‌ی نتایج موجود در جدول (۳) مشاهده می‌شود که هر سه روش باعث کاهش وزن مخزن نسبت به مرجع [10] (۳۳/۱۹ klb)شده‌اند.

جدول ۲ نتایج حاصل از ۲۵ اجرای متوالی روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده (klb)

	بدترین جواب‌ها	میانگین جواب‌ها	به‌ترین جواب	انحراف معیار
ICA	۳۸/۷٦	۳۳/۳۸	۳۱/٤۹	۱۵/۵۲
GA	۳۹/۵۷	۳۳/۹٤	۳۱/۵۱	۲۵/۱٤
PSO	٤۱/۲۷	۳٦/۱۲	۳۱/٦۷	۱۷/۵۷

همان‌طور که از نتایج جدول (۳) پیدا است الگوریتم رقابت استعماری باعث کاهش وزنی حدود ۵ درصد نسبت به هندبوک [10] شده است. در شکل‌های (۵- الف و ب) مقایسه‌ای بین نرخ همگرایی سه روش الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری ارائه شده است. با توجه به جدول (۲) و شکل‌های (۵-الف و ب) همگرایی روش الگوریتم رقابت استعماری به‌تر از الگوریتم‌های ژنتیک و گروه ذرات است، به‌طوری که با در نظر گرفتن پاسخ نهایی، از تکرار ۷۵ به بعد الگوریتم رقابت استعماری دارای عملکرد به‌تری نسبت به الگوریتم‌های دیگر است.

به‌عنوان مثال دیگر مشخصات یک مخزن تحت فشار استوانه‌ای که دو طرف آن به‌صورت نیمکره است و تاکنون در مقالات زیادی از آن به‌عنوان یک مسأله‌ی استاندارد مهندسی استفاده‌شده، در نظر گرفته می‌شود (شکل ٦). در این مسأله هدف طراحی، رسیدن به حداقل وزن کل مخزن شامل وزن ورقهای مورد استفاده و خط جوش‌ها به‌صورت رابطه‌ی (٢٤) می‌باشد [11].

$$W = 0.6224T_sRL + 1.7781T_hR^2 + 3.1661T_s^2L + 19.48T_s^2R \quad (٢٤)$$

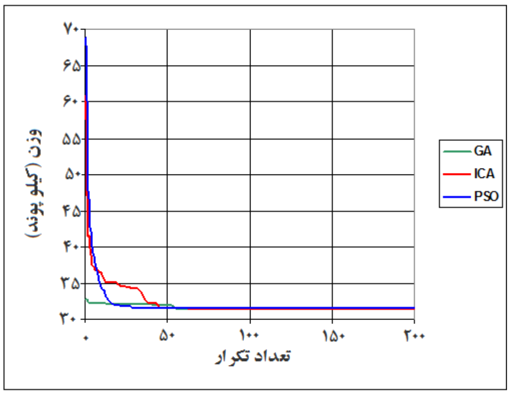
قیود مسأله به‌صورت روابط (٢٥) در نظر گرفته شده است [11].

$$\begin{aligned} &-T_s + 0.0193R \le 0 \\ &-T_h + 0.00954R \le 0 \\ &-\pi R^2 L - \frac{4}{3}\pi R^3 + 1296000 \le 0 \\ &L - 240 \le 0 \end{aligned} \quad (٢٥)$$

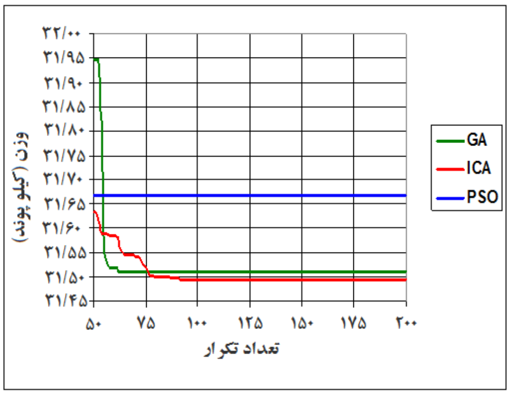
در روابط فوق T_s و T_h به‌ترتیب ضخامت مخزن در قسمت استوانه‌ی وسط و دو نیمکره در طرفین مخزن، R شعاع داخلی و L طول قسمت استوانه‌ای مخزن بدون در نظر گرفتن دو سر مخزن می‌باشد. متغیرهای T_s و T_h باید به‌صورت ضرایبی از ٠/٠٦٢٥ اینچ باشد (ضخامت پوسته‌ها فقط می‌تواند به‌صورت ضریبی از ضخامت صفحات غلطک شده باشد) و متغیرهای R و L به‌صورت پیوسته تغییر می‌کنند.

جدول ۳ نتایج حاصل از به‌ترین جواب‌های به‌دست آمده توسط روش‌های بهینه‌سازی ارائه شده در این مطالعه و مرجع [10]

	[10]	GA	PSO	ICA
t_1 (in)	٠/٦٦	٠/٦٣	٠/٦٣	٠/٦٣
t_2 (in)	٠/٥٠	٠/٣٧	٠/٣٧	٠/٤٠
t_3 (in)	٠/٢٥	٠/٢٠	٠/٢١	٠/٢١
h_2 (in)	٧٢	٦٦/٨٨	٦٦/٣٧	٧٠/٦٨
h_1 (in)	٤٠	٤٠/٣٩	٤٢/٥٦	٤١/٠٩
W(klb)	٣٣/١٩	٣١/٥١	٣١/٦٧	٣١/٤٩

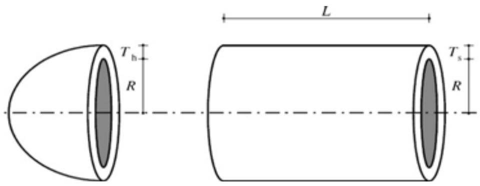


شکل ٥- الف مقایسه نرخ همگرایی سه روش GA، PSO و ICA



شکل ٥-ب مقایسه نرخ همگرایی سه روش GA، PSO و ICA بین تکرارهای ٥٠ تا ٢٠٠

در جدول (٤) مقادیر بهینه‌ی پارامترهای طراحی مخزن شکل (٦) به‌ازای به‌ترین جواب به‌دست آمده با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی شاخه و کران [11]، ضرایب لاگرانژ اصلاح یافته [12]، روش جستجوی ژنتیک خود انطباقی [13]، مدل تکاملی الگوریتم ژنتیک [14]، انتخاب مسابقه‌ی امکان‌پذیر [15]، الگوریتم گروه ذرات [16]، روش تکاملی [17]، الگوریتم بهبود یافته‌ی گروه مورچه‌ها [18] و روش بهینه‌سازی رقابت استعماری این مطالعه ارائه شده است. در جدول (٥) نتایج به‌دست آمده برای ٢٥ تکرار متوالی روش رقابت استعماری و روش‌های گذشته ارائه شده است. با استفاده از داده‌های جدول (٥ و ٤) مشاهده می‌شود که روش رقابت استعماری نسبت به روش‌های دیگر ارائه شده در این جدول‌ها به به‌ترین جواب دست پیدا کرده و علاوه بر آن دارای به‌ترین مقدار میانگین، بدترین و کم‌ترین انحراف معیار جواب‌ها می‌باشد.



شکل ٦ مخزن تحت فشار استوانه‌ای

جدول ٤ مقادیر متغیرهای طراحی برای مخزن شکل (٦)

	مقادیر بهینه پارامترهای طراحی				وزن مخزن
	Ts	T_h	R	L	
Branch and bound [11]	١/١٢٥٠٠٠	٠/٦٢٥٠٠٠	٤٧/٧٠٠٠٠٠	١٠٧/٧٠١٠٠٠	٨١٢٩/١٠٣٦
Augmented Lagrangian multiplier [12]	١/١٢٥٠٠٠	٠/٦٢٥٠٠٠	٥٨/٢٩١٠٠٠	٤٣/٦٩٠٠٠٠	٧١٩٨/٠٤٢٨
Genetic adaptive search [13]	٠/٩٣٧٥٠٠	٠/٥٠٠٠٠٠	٤٨/٣٢٩٠٠٠	١١٢/٦٧٩٠٠٠	٦٤١٠/٣٨١١
GA-based co-evolution model [14]	٠/٨١٢٥٠٠	٠/٤٣٧٥٠٠	٤٠/٣٢٣٩٠٠	٢٠٠/٠٠٠٠٠٠	٦٢٨٨/٧٤٤٥
Feasibility-based tournament selection [15]	٠/٨١٢٥٠٠	٠/٤٣٧٥٠٠	٤٢/٠٩٧٣٩٨	١٧٦/٦٥٤٠٥٠	٦٠٥٩/٩٤٦٣
Particle swarm optimization [16]	٠/٨١٢٥٠٠	٠/٤٣٧٥٠٠	٤٢/٠٩١٢٦٦	١٧٦/٧٤٦٥٠٠	٦٠٦١/٠٧٧٧
Evolution strategy [17]	٠/٨١٢٥٠٠	٠/٤٣٧٥٠٠	٤٢/٠٩٨٠٨٧	١٧٦/٦٤٠٥١٨	٦٠٥٩/٧٤٥٦
Improved ant colony optimization [18]	٠/٨١٢٥٠٠	٠/٤٣٧٥٠٠	٤٢/٠٩٨٣٥٣	١٧٦/٦٣٧٧٥١	٦٠٥٩/٧٢٥٨
ICA	٠/٨١٢٥٠٠	٠/٤٣٧٥٠٠	٤٢/٠٩٨٤٤٥	١٧٦/٦٣٦٥٩٦	٦٠٥٩/٧١٤٣

جدول ٥ نتایج آماری برای ٢٥ اجرای متوالی روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای مخزن شکل (٦)

	به‌ترین جواب‌ها	میانگین جواب‌ها	بدترین جواب‌ها	انحراف معیار جواب‌ها
Branch and bound [11]	٨١٢٩/١٠٣٦	–	–	–
Augmented lagrangian multiplier [12]	٧١٩٨/٠٤٢٨	–	–	–
Genetic adaptive search [13]	٦٤١٠/٣٨١١	–	–	–
GA-based co-evolution model [14]	٦٢٨٨/٧٤٤٥	٦٢٩٣/٨٤٣٢	٦٣٠٨/١٤٩٧	٧/٤١٣٣
Feasibility-based tournament selection [15]	٦٠٥٩/٩٤٦٣	٦١٧٧/٢٥٣٣	٦٤٦٩/٣٢٢٠	١٣٠/٩٢٩٧
Particle swarm optimization [16]	٦٠٦١/٠٧٧٧	٦١٤٧/١٣٣٢	٦٣٦٣/٨٠٤١	٨٦/٤٥٤٥
Evolution strategy [17]	٦٠٥٩/٧٤٥٦	٦٨٥٠/٠٠٤٩	٧٣٣٢/٨٧٩٨	٤٢٦/٠٠٠٠
Improved ant colony optimization [18]	٦٠٥٩/٧٢٥٨	٦٠٨١/٧٨١٢	٦١٥٠/١٢٨٩	٦٧/٢٤١٨
ICA	٦٠٥٩/٧١٤٣	٦٠٥٩/٨١٤٩	٦٠٦٠/٨٣٠٢	٠/٢٦٣٣

نتیجه‌گیری

در این مقاله، سعی بر آن بود تا با ارائه‌ی نمونه‌های عملی، توانایی بالای روش بهینه‌سازی رقابت استعماری در طراحی مخازن جدار نازک نشان داده شود. با توجه به حیاتی بودن طراحی بهینه و ایمن مخازن تحت فشار، روش ارائه شده در این مقاله توانست بدون نقض قیود و ضوابط مهندسی، طی زمان بسیار مناسبی به جواب بهینه همگرا شود. بر اساس نتایج ارائه شده روش رقابت استعماری می‌تواند ابزاری مناسب و کارا برای طراحی مخازن جدار نازک نسبت به روش‌های بهینه‌سازی دیگر باشد و هم‌چنین به‌تر از هندبوک‌های موجود عمل کند.

فهرست علائم

فشار ناشی از نیروی باد (Psi)	P_w
ارتفاع نردبان مخزن از سطح زمین (in)	H_{La}
ارتفاع سکوی مخزن از سطح زمین (in)	H_{PL}
سطح تصویر شده نردبان مخزن برای هر فوت از ارتفاع (in^2)	A_{La}
سطح تصویر شده سکوی مخزن (in^2)	A_{PL}
وزن سیال درون مخزن (lb)	W_g
وزن دیگر قطعات متصل به مخزن (lb)	W_g
وزن دیگر قطعات متصل به مخزن (lb)	W_{Other}
چگالی ورق مورد استفاده در ساخت مخزن (lb/in^3)	ρ_s
چگالی عایق مورد استفاده در ساخت مخزن (lb/in^3)	ρ_{IN}

مراجع

1. Moss, R., "*Pressure Vessel Design Manual*", Elsevier, 3th Ed., (2004).
2. Bednar, H.H., "*Pressure Vessel Design Handbook*", Van Nostrand Co., New York, (1989).
3. Ping, Xu., Jinyang, Z., Honggang C. and Pengfei, L., "Optimal design of high pressure hydrogen storage vessel using an adaptive genetic algorithm", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 7, pp. 2840-46, (2010).
4. Vasan, A. and Raju, K.S., "Comparative analysis of Simulated Annealing, Simulated Quenching and Genetic Algorithms for optimal reservoir operation", *Applied Soft Computing*, Vol. 9, No. 1, pp. 274-281, (2009).
5. Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C., "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", in: *IEEE congress on evolutionary computation*, Singapore, pp. 4661-7, (2007).
6. Sheikhi, M., Ghoddosian, A. and Sheikhi, M., "Optimal design of structural support position using ICA and MFEM", *The Modares Journal of Mechanics Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 50-59, (2012).
7. قدوسیان، علی، شیخی، مجتبی،«روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در مهندسی»، انتشارات دانشگاه سمنان، (۱۳۹۲).
8. Eberhart, R.C. and Kennedy, J., "A new optimizer using particle swarm theory", Proceeding of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 39-43. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, (1995).

9. Perez, R.E. and Behdinan, K., "Particle swarm approach for structural design optimization", *Computers and Structures*, Vol. 85, pp. 1579-1588, (2007).
10. Eugene, F. and Megyesy, P.B., "Pressure Vessel Handbook" 12th ED, University of Tulsa, Oklahoma, (2002).
11. Sandgren, E., "Nonlinear integer and discrete programming in mechanical design". In: Proceedings of the *ASME design technology conference*, Kissimine, FL, pp. 95-105, (1988).
12. Kannan, B.K. and Kramer, S.N., "An augmented Lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design", Trans. ASME *Journal of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 318-320, (1994).
13. Deb, K. and Gene, A.S. "A robust optimal design technique for mechanical component design", In: Dasgupta D., Michalewicz Z. (eds.) Evolutionary Algorithms in Engineering Applications, Springer, Berlin, pp. 497-514, (1997).
14. Coello, C.A.C., "Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems", *Computers in Industry*, Vol. 41, No. 2, pp. 113-127, (2000).
15. Coello, C.A.C. and Montes, E.M., "Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 16, pp. 193-203, (2002).
16. He, Q. and Wang, L., "An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp. 89-99, (2007).
17. Montes, E.M. and Coello, C.A.C.," An empirical study about the usefulness of evolution strategies to solve constrained optimization problems", *International Journal of General Systems*, Vol. 37, No. 4, pp. 443-473, (2008).
18. Kaveh, A. and Talatahari, S., "An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems", *Engineering Computations*, Vol. 27, No. 1, pp. 155-182, (2010).